

# Perancangan dan Simulasi *Full Bridge Inverter* Lima Tingkat dengan *Dual Buck Converter* Terhubung Jaringan Satu Fasa

Zamratul Fuadi, Mochamad Ashari, dan Feby Agung P.

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: zamratul.fuadi@gmail.com, ashari@ee.its.ac.id, febyagungpamuji@gmail.com

**Abstrak**—Inverter merupakan perangkat elektronika daya yang berfungsi mengonversi sumber searah menjadi bolak-balik. *Full bridge inverter* adalah satu jenisnya yang mampu menghasilkan tegangan tiga tingkat jika menggunakan teknik modulasi *unipolar*. Penambahan sirkuit *dual buck converter* pada *full bridge inverter* mampu menghasilkan tegangan dalam lima tingkat. Dua saklar pada rangkaian *dual buck converter switching* pada frekuensi tinggi 20 kHz, sedangkan empat saklar pada *full bridge inverter switching* pada frekuensi rendah 50 Hz. Teknik modulasi *in phase disposition* PWM (PDPWM) digunakan untuk mengatur penyalan saklar *dual buck converter*. Keluaran inverter lima tingkat dibandingkan dengan tiga tingkat. *Total harmonic distortion* tegangan ( $THD_v$ ) dan arus ( $THD_i$ ) inverter lima tingkat bernilai 23.2281 % dan 23.0975 %, sedangkan inverter tiga tingkat sebesar 51.9302 % dan 52.2458 %. Ketika daya 1004.08 watt disumbangkan ke jala-jala, inverter lima tingkat menghasilkan *power factor* senilai 0.99 dan  $THD_i$  4.1 %. Pada sumbangan daya yang sama, inverter tiga tingkat menghasilkan *power factor* sebesar 0.919 dan  $THD_i$  45.64 %.

**Kata Kunci**—inverter lima tingkat, inverter tiga tingkat, *power factor*, *sinusoidal pulse width modulation* (SPWM),  $THD_i$ ,  $THD_v$ .

## I. PENDAHULUAN

JUMLAH populasi manusia terus meningkat, oleh sebab itu, konsumsi energi khususnya listrik juga akan ikut meningkat. Energi primer yang digunakan sebagai bahan bakar pembangkit rata-rata adalah energi fosil yang tidak dapat diperbarui. Jika energi fosil ini terus dieksplorasi, tanpa ada upaya mengimbangnya dengan energi terbarukan, dunia dapat dipastikan mengalami krisis energi di masa yang akan datang. Salah satu solusi mengatasi masalah ini adalah pemanfaatan *photovoltaic* sebagai salah satu pembangkit listrik yang tersebar.

Masa depan, sistem pembangkit listrik tersebar dengan kapasitas daya kecil akan menjadi *trend* pada sistem tenaga [1]. Oleh karenanya, kualitas daya dari pembangkit tersebut menjadi sangat penting untuk ditingkatkan. Perangkat elektronika daya seperti *boost converter* dan inverter dibutuhkan sebelum sumber energi *photovoltaic* dapat dimanfaatkan. *Boost converter* berfungsi menaikkan tegangan keluaran *photovoltaic*, sedangkan inverter akan mengonversinya menjadi tegangan bolak-balik. Di samping meneliti *boost converter*, pakar teknologi bidang elektronika daya juga gencar melakukan pengembangan pada inverter agar

diperoleh tegangan *sinusoidal* yang lebih baik.

Pada awalnya, inverter jenis konvensional seperti *half bridge* dan *full bridge inverter* digunakan dalam implementasi untuk menghasilkan tegangan bolak-balik. Kemudian untuk meningkatkan efisiensi daya, inverter jenis *multilevel* seperti *diode clamped*, *flying capacitor*, dan *cascade H-Bridge* pun dikembangkan. Inverter jenis ini diklaim dapat mengurangi *total harmonic distortion* (THD) pada tegangan dan arus keluarannya.

*Diode clamped* dan *flying capacitor* mampu menghasilkan tegangan bolak-balik tiga tingkat. Guna menghasilkan tegangan lima tingkat, penambahan komponen *switching* diperlukan. Penambahan jumlah komponen ini mempersulit proses pengontrolan rangkaian. Jika menggunakan *cascade h-bridge*, tegangan keluaran lima tingkat dapat dihasilkan. Akan tetapi, dua sumber tegangan searah dibutuhkan. Pada topologi *full bridge inverter* dengan *dual buck converter*, tegangan keluaran lima tingkat diperoleh dengan pengontrolan rangkaian cukup sederhana. Selain itu, komponen saklarnya yang *switching* pada frekuensi tinggi lebih sedikit dibandingkan dengan inverter lima tingkat lainnya.

## II. INVERTER LIMA TINGKAT

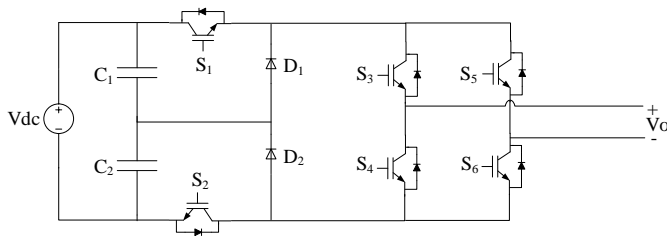
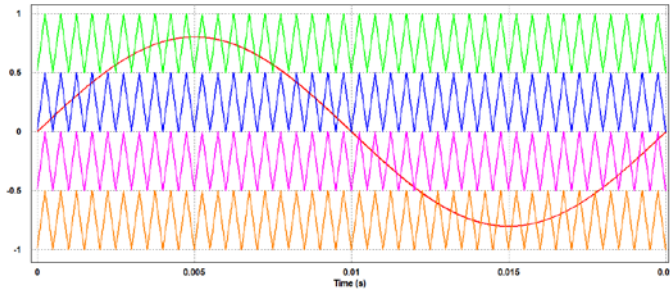
### A. *Photovoltaic*

Sumber energi terbarukan telah banyak dikembangkan, salah satunya dikenal dengan nama *photovoltaic* (PV). PV merupakan teknologi menggunakan komponen semikonduktor yang dapat memanfaatkan energi matahari berupa radiasi cahaya menjadi sumber listrik searah. Saat ini, bahan semikonduktor yang umum digunakan adalah jenis *silicon*.

Untuk menghasilkan kapasitas daya sesuai kebutuhan, beberapa PV harus dihubungkan. PV yang terhubung dengan PV lain disebut modul PV, sedangkan modul yang saling terhubung disebut dengan *photovoltaic array*. Kemudian, agar daya listrik yang dihasilkan maksimum, *photovoltaic array* harus dipasang pada sudut yang tepat terhadap pergerakan matahari.

### B. *Full Bridge Voltage Source Inverter* (VSI)

*Full bridge* VSI adalah salah satu jenis inverter sederhana yang terdiri dari sumber searah, kapasitor, dan empat buah komponen saklar semikonduktor. Kapasitor pada rangkaian tersebut berfungsi sebagai tempat penyimpanan sumber

Gambar 1. Topologi *full bridge inverter* dengan *dual buck converter*

Gambar 2. Teknik modulasi PDPWM

sementara. Hal ini berbeda dengan jenis *full bridge current source inverter* (CSI) yang menggunakan induktor sebagai tempat penyimpanan semantarnya.

#### A. Full Bridge Inverter dengan Dual Buck Converter

*Full bridge inverter* dengan *dual buck converter* adalah topologi baru dari jenis inverter. Ketika menggunakan teknik modulasi *unipolar*, tegangan keluaran yang dihasilkan oleh *full bridge inverter* adalah tiga tingkat. Namun, dengan menambahkan *dual buck converter* pada rangkaian tersebut, keluaran dalam lima tingkat dapat dihasilkan. Gambar 1 adalah rangkaian *full bridge inverter* dengan *dual buck converter*.

#### B. Multicarrier PWM

*Multicarrier PWM* adalah salah satu strategi alternatif dalam teknik modulasi pengembangan dari SPMW. Prinsipnya hampir sama dengan SPWM, yaitu sinyal referensi berupa sinus dibandingkan dengan sinyal segitiga. Akan tetapi, m-1 sinyal *carrier* dibutuhkan untuk menghasilkan m-tingkat tegangan keluaran. Semua sinyal pembawa memiliki nilai amplitudo dan frekuensi yang sama.

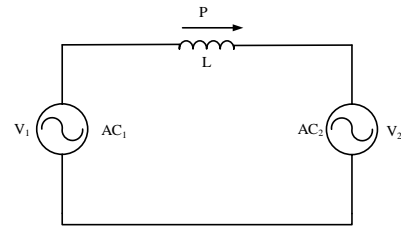
Salah satu jenis teknik modulasi *multicarrier PWM* adalah *in phase disposition PMW* (PDPWM). Pada teknik PDPWM, semua *carrier* memiliki sudut fasa dan frekuensi yang sama. Gambar 2 menunjukkan teknik modulasi PDPWM.

Indeks modulasi amplitudo PDPWM dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$M_a = \frac{2A_r}{(m-1) \times A_c} \quad (1)$$

di mana  $M_a$  adalah indeks modulasi amplitudo,  $A_r$  merupakan amplitudo sinyal referensi,  $m$  adalah tingkat dari *inverter*, dan  $A_c$  amplitudo dari sinyal *carrier*.

Untuk rasio frekuensinya dapat dihitung dengan persamaan berikut,



Gambar 3. Dua sumber tegangan yang terhubung

$$M_f = \frac{f_c}{f_m} \quad (2)$$

di mana  $M_f$  adalah rasio frekuensi,  $f_c$  frekuensi sinyal *carrier*, dan  $f_m$  frekuensi sinyal referensi.

#### A. Distorsi Harmonisa

Pada kondisi ideal, gelombang arus maupun tegangan seharusnya hanya memiliki satu frekuensi dasar. Gelombangnya dikatakan memiliki harmonisa jika pada gelombang tersebut terdapat sinyal dengan frekuensi kelipatan dari frekuensi fundamentalnya. Parameter yang digunakan untuk mengetahui kandungan harmonisa dikenal dengan istilah *total harmonic distortion* (THD).

Terdapat dua jenis parameter THD,  $THD_v$  untuk tegangan dan  $THD_i$  untuk arus. Kedua parameter tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini.

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \quad (3)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N i_n^2}}{i_1} \quad (4)$$

Nilai THD biasanya dinyatakan dalam persen. Ketika nilainya cukup besar, risiko peralatan mengalami kerusakan semakin besar pula. Terdapat batasan nilai THD untuk tegangan maupun arus yang diizinkan.

Untuk sistem dengan tegangan di bawah 69 kV, IEEE 519 memberi batasan sebesar 3 % untuk *individual harmonic* dan 5 % untuk *total harmonic distortion*nya [2]. Semakin besar tegangan suatu sistem, batasan distorsi harmonik yang diperbolehkan pun semakin kecil.

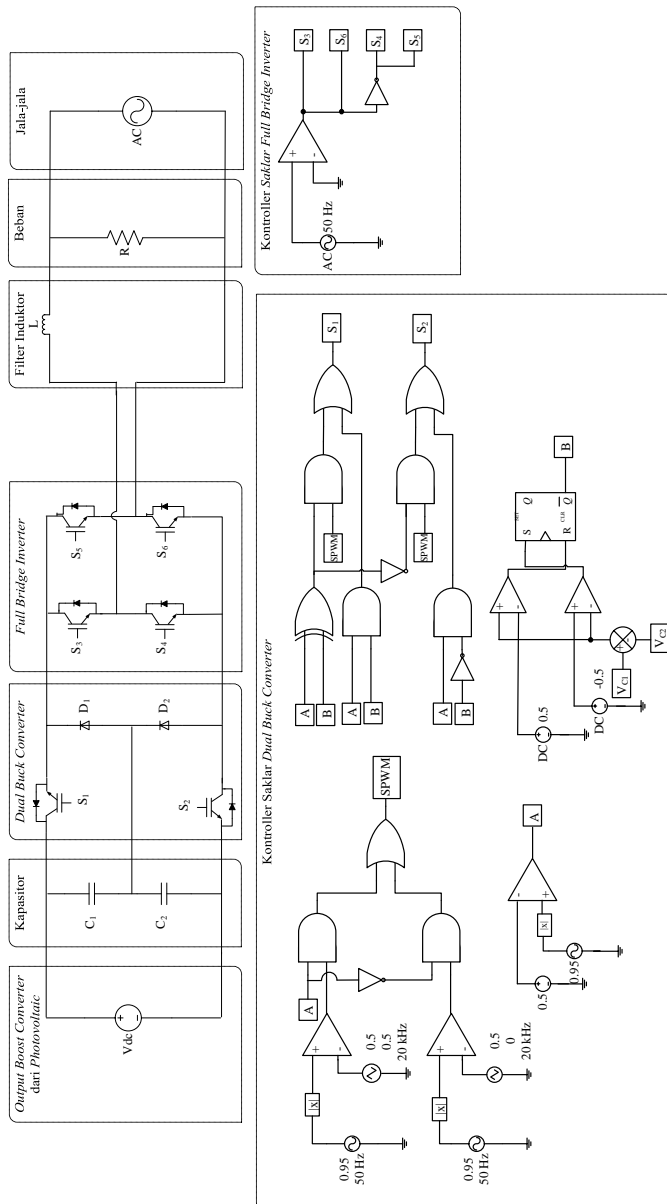
#### B. Aliran Daya Dua Sumber Tegangan yang Terhubung

Ketika dua sumber tegangan terhubung seperti yang ditunjukkan gambar 3, aliran daya aktif yang melewati induktor dapat dihitung dengan persamaan (5) berikut ini.

$$P = \frac{V_1 \times V_2}{X_L} \sin \delta \quad (5)$$

di mana  $P$  adalah aliran daya aktif,  $V_1$  sumber tegangan  $AC_1$ ,  $V_2$  sumber tegangan  $AC_2$ ,  $X_L$  adalah induktansi dan  $\delta$  merupakan beda sudut fasa tegangan  $AC_1$  dengan  $AC_2$ .

### III. PERANCANGAN *FULL BRIDGE INVERTER* LIMA TINGKAT DENGAN *DUAL BUCK CONVERTER*



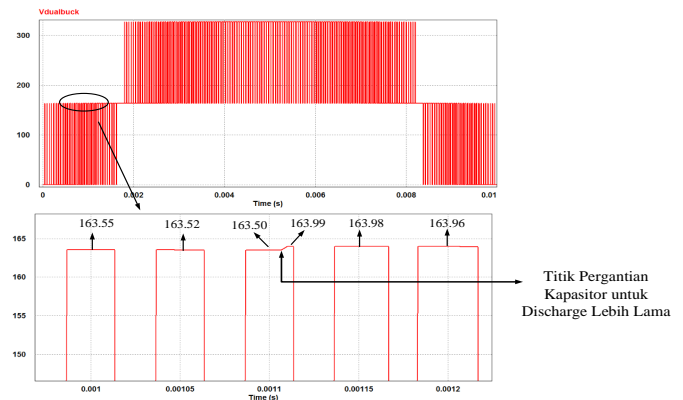
Gambar 4. Sistem *full bridge inverter* lima tingkat dengan *dual buck converter*

Perancangan *full bridge inverter* dengan *dual buck converter* keseluruhan dapat dilihat pada gambar 4. Berdasarkan gambar tersebut, sistem terdiri dari keluaran *boost converter*, kapasitor, *dual buck converter*, *full bridge inverter*, beban rumah tangga, filter induktor dan sumber tegangan bolak-balik sebagai jala-jala. Sistem disimulasikan menggunakan *software* Psim.

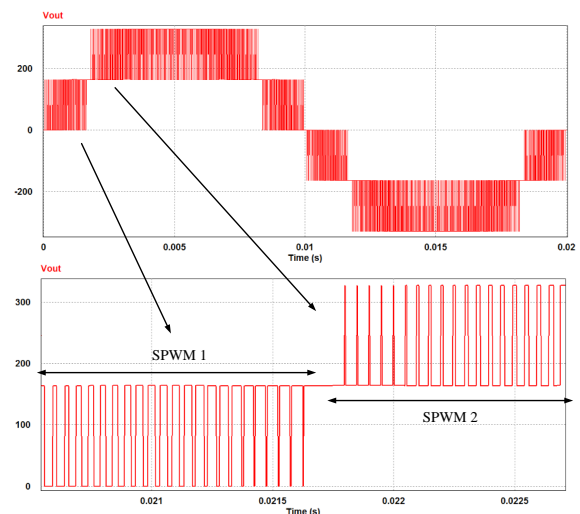
### IV. SIMULASI DAN ANALISIS DATA

#### A. Keluaran *Dual Buck Converter*

Pada topologi *full bridge inverter* lima tingkat, *dual buck converter* berfungsi menghasilkan tegangan searah dalam tiga tingkat. Tegangan tersebut meliputi 0,  $V_{dc}/2$ , dan  $V_{dc}$ . Keluaran ini akan menjadi masukan pada rangkaian *full bridge inverter*.



Gambar 5. Tegangan searah tiga tingkat



Gambar 6. Keluaran *full bridge inverter* lima tingkat

Tegangan DC tiga tingkat yang dihasilkan *dual buck converter* bernilai 0, 163.75, dan 327.5 volt. Akan tetapi, terdapat dua tegangan bernilai 163.5 dan 163.99 volt ketika salah satu titik pada 163.75 volt ( $0.5V_{dc}$ ) diamati.

Pada saat kapasitor  $C_1$  discharge lebih lama, tegangannya akan turun 0.25 volt, sedangkan kapasitor  $C_2$  naik 0.25 volt dari nilai yang seharusnya. Seketika itu juga, kapasitor  $C_2$  akan discharge lebih lama menggantikan kapasitor  $C_1$ . Hal ini terjadi karena selisih maksimal tegangan kedua kapasitor telah diset 0.5 volt menggunakan histerisis. Jadi, setiap pergantian kapasitor untuk discharge lebih lama, tegangan awalnya akan naik 0.25 volt seperti yang ditunjukkan gambar 5.

#### B. Keluaran *Full Bridge Inverter* Lima Tingkat

Berdasarkan gambar 6, *full bridge inverter* menghasilkan tegangan bolak-balik lima tingkat berfrekuensi 50 Hz. Jika diamati lebih detail, tegangan tersebut memiliki lebar pulsa yang tidak sama. Hal ini disebabkan oleh teknik modulasi SPWM yang digunakan.

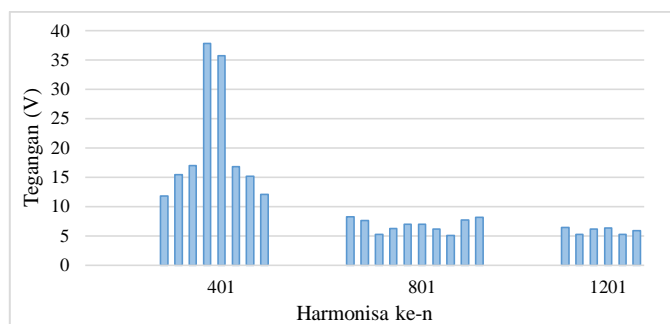
#### C. Perbandingan THD *Full Bridge Inverter* Lima Tingkat dengan Tiga Tingkat

Total harmonic distortion (THD) dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara nilai rms harmonik terhadap komponen dasarnya pada suatu gelombang. Dari nilai THD, kualitas keluaran inverter dapat diketahui. Pada subbab ini,

Tabel 1.

Harmonik *full bridge inverter* lima tingkat

Harmonik ke-n	Nilai		Harmonik ke-n	Nilai	
	Tegangan	Arus		Tegangan	Arus
391	11.79	0.22	799	6.98	0.13
393	15.41	0.29	801	6.98	0.13
397	16.98	0.32	803	6.21	0.12
399	37.85	0.7	807	5.06	0.09
401	35.77	0.67	809	7.75	0.14
403	16.77	0.31	811	8.16	0.15
407	15.16	0.28	1191	6.43	0.12
409	12.04	0.22	1195	5.3	0.09
789	8.25	0.15	1199	6.18	0.11
791	7.67	0.14	1201	6.33	0.12
793	5.22	0.09	1205	5.25	0.09
797	6.29	0.12	1209	5.88	0.11
Tegangan Fundamental				311.28 V	
Arus Fundamental				5.79 A	
THD <sub>V</sub>				23.2281 %	
THD <sub>i</sub>				23.0975 %	



Gambar 7. Spektrum harmonisa tegangan

nilai THD *full bridge inverter* lima tingkat dengan tiga tingkat dibandingkan. Ketika melakukan simulasi, indeks modulasi amplitudo dan sinyal pembawa kedua inverter bernilai sama yaitu 0.95 dan 20 kHz, sedangkan filter induktor sama-sama tidak dipasang.

### C.1 Full Bridge Inverter Lima Tingkat

Harmonik tegangan maupun arus dari *full bridge inverter* lima tingkat dapat dilihat pada tabel 1.

Berdasarkan tabel 1, nilai harmonik terbesar untuk tegangan berada pada orde ke 399 dan 401 dengan nilai 37.85 dan 35.77 volt. Sedangkan untuk arus, harmonik terbesar muncul pada orde yang sama dengan nilai 0.7 dan 0.67 ampere. Semua harmonik yang muncul baik tegangan maupun arus berada pada orde ganjil. THD<sub>V</sub> bernilai 23.2281 % dan THD<sub>i</sub> bernilai 23.0975 %.

Berdasarkan gambar 7, *full bridge inverter* lima tingkat menghasilkan harmonisa orde ganjil di sekitar orde 401, 801, dan 1201.

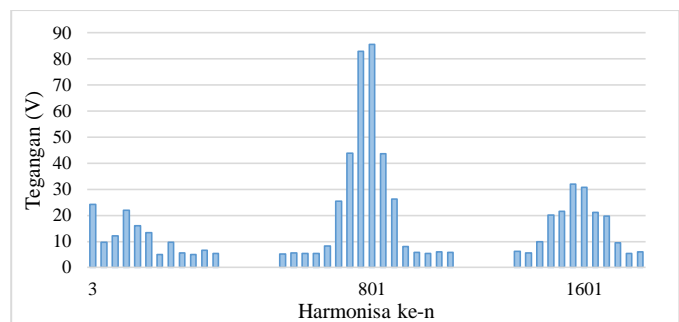
### C.2 Full Bridge Inverter Tiga Tingkat

Teknik modulasi *unipolar* digunakan untuk mengatur penyalan saklar rangkaian *full bridge inverter*. Dengan menggunakan teknik modulasi ini, tegangan bolak-balik tiga tingkat akan dihasilkan. Harmonik tegangan maupun arus dari *full bridge inverter* tiga tingkat dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2.

Harmonik *full bridge inverter* tiga tingkat

Harmonik ke-n	Nilai		Harmonik ke-n	Nilai	
	Tegangan	Arus		Tegangan	Arus
3	24.17	0.45	801	85.56	1.59
5	9.71	0.18	803	43.69	0.81
7	12.17	0.23	805	26.31	0.5
9	21.89	0.41	807	8.05	0.15
13	15.94	0.29	809	5.88	0.11
15	13.44	0.25	811	5.39	0.1
21	5.03	0.09	817	5.97	0.11
23	9.64	0.18	819	5.79	0.11
27	5.64	0.11	1587	6.28	0.12
33	5.02	0.09	1589	5.62	0.1
41	6.69	0.12	1591	9.84	0.2
55	5.38	0.1	1595	20.18	0.4
781	5.18	0.1	1597	21.57	0.4
783	5.51	0.1	1599	32.01	0.6
789	5.32	0.1	1601	30.72	0.6
791	5.46	0.1	1603	21.25	0.4
793	8.19	0.15	1605	19.65	0.4
795	25.44	0.5	1609	9.55	0.2
797	43.76	0.81	1611	5.49	0.1
799	82.99	1.54	1613	6.03	0.11
Tegangan Fundamental				311.27 V	
Arus Fundamental				5.79 A	
THD <sub>V</sub>				51.9302 %	
THD <sub>i</sub>				52.2458 %	



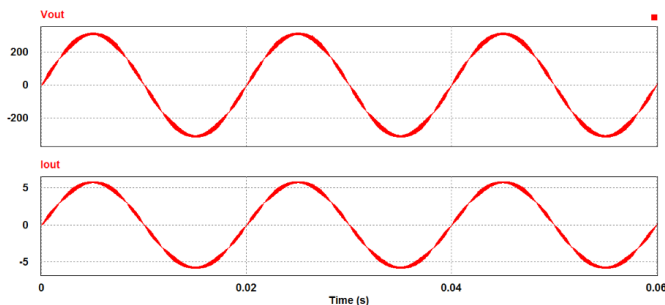
Gambar 8. Spektrum harmonisa tegangan

Berdasarkan tabel 2, nilai harmonik terbesar untuk tegangan berada pada orde ke 799 dan 801 dengan nilai 82.99 dan 85.56 volt. Sedangkan untuk arus, harmonik terbesar muncul pada orde yang sama dengan nilai 1.54 dan 1.59 A. Semua harmonik yang muncul baik tegangan maupun arus berada pada orde ganjil. THD<sub>V</sub> bernilai 51.9302 % dan THD<sub>i</sub> bernilai 52.2458 %. Ini berarti THD keluaran *full bridge inverter* lima tingkat lebih kecil dari *full bridge inverter* tiga tingkat.

Berdasarkan gambar 8, *full bridge inverter* tiga tingkat menghasilkan harmonisa orde ganjil di sekitar orde 3, 801, dan 1601.

### D. Keluaran Full Bridge Inverter Lima Tingkat Setelah Pemasangan Filter Induktor (L)

Menurut IEEE Standard 519, THD tegangan bolak-balik harus kurang dari 5 % [3]. Karena hal tersebut, filter induktor berukuran 3 mH dipasang untuk mereduksi nilai THD keluaran *full bridge inverter* lima tingkat. Gambar 9 menunjukkan hasil tegangan dan arus setelah filter induktor dipasang.



Gambar 9. Tegangan dan arus setelah penambahan filter induktor

Tabel 3.  
Harmonik setelah pemasangan filter induktor

Harmonik ke-n	Nilai	
	Tegangan (V)	Arus (A)
391	1.73	0.03
393	2.2	0.04
397	2.34	0.04
399	5.33	0.1
401	5.03	0.09
403	2.27	0.04
407	2.08	0.04
409	1.68	0.03
Tegangan Fundamental		311 V
Arus Fundamental		5.78 A
THD <sub>v</sub>		2.863723 %
THD <sub>i</sub>		2.805757 %

Harmonik tegangan maupun arus setelah dilakukan pemasangan induktor dapat dilihat pada tabel 3.

Berdasarkan tabel 3, nilai harmonik terbesar untuk tegangan pada orde ke 399 dan 401 turun dari 37.85 menjadi 5.33 dan 35.77 menjadi 5.03 volt. Sedangkan untuk arus, nilainya turun dari 0.7 menjadi 0.1 dan 0.67 menjadi 0.09 ampere. THD<sub>v</sub> sekarang bernilai 2.86 % dan THD<sub>i</sub> bernilai 2.81 %.

#### E. Performa Aliran Daya Full Bridge Inverter Lima Tingkat ketika Terhubung Jala-jala

Selain untuk pemakaian sendiri, sumber tegangan bolak-balik keluaran inverter juga dirancang agar dapat diinjeksikan ke jala-jala. Ketika melakukan simulasi, inverter dihubungkan dengan *grid* satu fasa bertegangan 220 volt dan frekuensi 50 Hz.

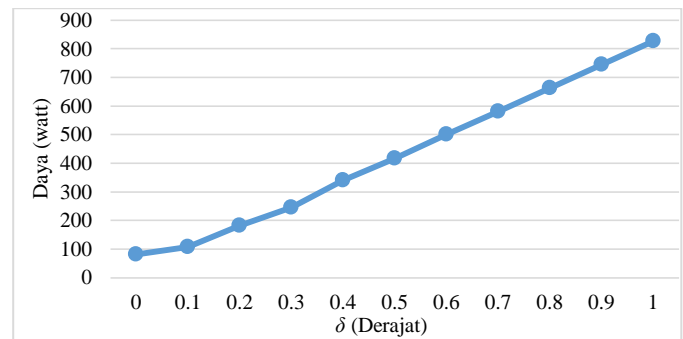
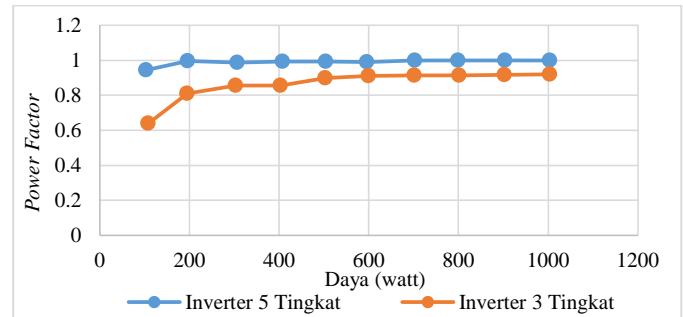
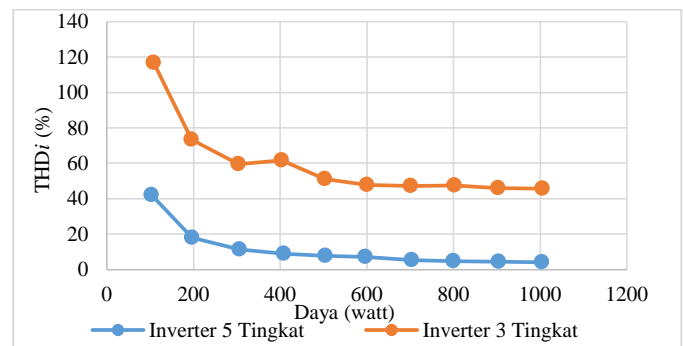
Aliran daya menuju jaringan dapat ditentukan dengan mengatur beda sudut fasa ( $\delta$ ) antara kedua tegangan. Inverter yang telah dipasang filter dihubungkan dengan jala-jala tanpa menyuplai beban rumah tangga.

Berdasarkan gambar 10, semakin besar nilai  $\delta$ , daya aktif yang mengalir ke jala-jala pun semakin besar.

#### F. Perbandingan Power Factor (PF) Full Bridge Inverter Lima Tingkat dengan Tiga Tingkat

Power factor keluaran inverter dipengaruhi oleh besar daya aktif yang disumbangkan ke jala-jala. Ketika pengujian, beban rumah tidak terhubung dengan inverter.

Mengacu pada gambar 11, PF inverter lima tingkat bernilai mendekati 1 ketika daya yang disumbangkan ke *grid* minimal 200 watt. Namun berbeda dengan PF inverter tiga tingkat, nilainya cenderung hanya sekitar 0.9 setelah daya sebesar 500 watt diinjeksikan. Dengan demikian, inverter lima tingkat

Gambar 10. Kurva aliran daya ke *grid*Gambar 11. Kurva *power factor*Gambar 12. Kurva THD<sub>i</sub>

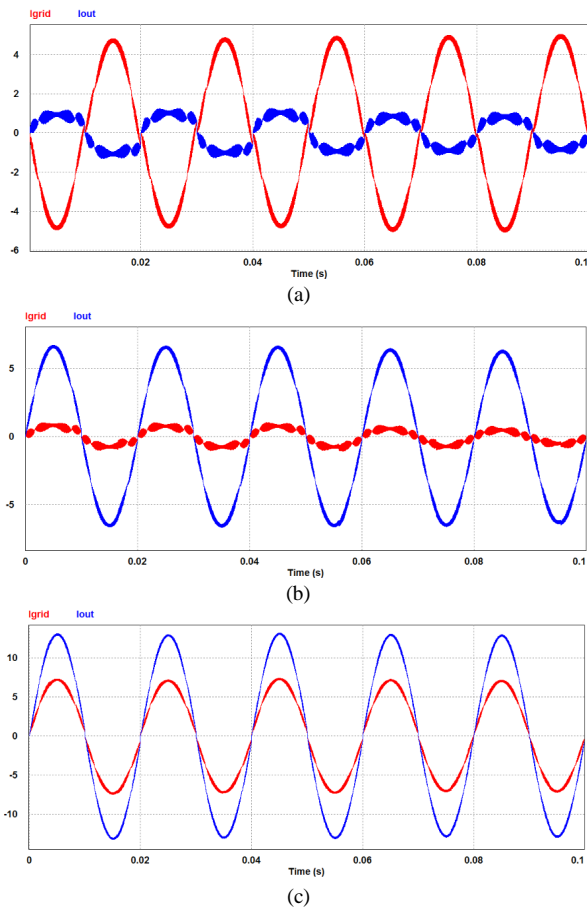
memiliki *power factor* lebih baik dibandingkan dengan inverter tiga tingkat ketika dihubungkan dengan jala-jala.

#### G. Perbandingan THD<sub>i</sub> Full Bridge Inverter Lima Tingkat dengan Tiga Tingkat

Simulasi dilakukan dengan memvariasikan aliran daya aktif ke jaringan mulai dari 100 watt sampai dengan 1 kW. Kemudian, setiap perubahan besar daya, THD<sub>i</sub> inverter lima tingkat dibandingkan dengan inverter tiga tingkat. Sama dengan pengujian *power factor*, beban rumah tidak dihubungkan dengan sistem.

Berdasarkan gambar 12, nilai THD<sub>i</sub> kedua jenis inverter cenderung turun ketika daya yang diinjeksikan ke jala-jala naik. Pada saat aliran daya menuju *grid* berkisar 200 watt, THD<sub>i</sub> yang dihasilkan inverter tiga tingkat cukup besar yaitu berkisar 75 %. Padahal, inverter lima tingkat hanya menghasilkan THD<sub>i</sub> berkisar 20 %.





Gambar 13. Arus keluaran inverter (biru) dan *grid* (merah) *full Bridge inverter* lima tingkat; (a)  $\delta = 0.1^\circ$ ; (b)  $\delta = 1.2^\circ$ ; (c)  $\delta = 2.2^\circ$ .

#### H. Performa Aliran Daya Keseluruhan Sistem

Pada pengujian ini, inverter lima tingkat, beban rumah, dan jala-jala saling terhubung. Aliran daya maupun bentuk arus keluaran inverter dan *grid* diamati ketika  $\delta$  diubah-ubah.

Bentuk gelombang arus keluaran inverter dan *grid* ketika  $\delta$  bernilai  $0.1^\circ$ ,  $1.2^\circ$ , dan  $2.2^\circ$  berturut-turut dapat dilihat pada gambar 13.

Berdasarkan gambar 13, arus inverter memiliki beda fasa  $180^\circ$  dengan *grid* ketika beban rumah disuplai dari jala-jala. Akan tetapi, arusnya terlihat sefasa ketika inverter mulai menginjeksi daya ke jala-jala.

#### V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Inverter lima tingkat menghasilkan THD yang lebih kecil dibandingkan dengan inverter tiga tingkat. Inverter lima tingkat menghasilkan  $THD_V$  sebesar 23.2281 % dan  $THD_i$  sebesar 23.0975 %, sedangkan inverter tiga tingkat menghasilkan  $THD_V$  sebesar 51.9302 % dan  $THD_i$  sebesar 52.2458 %.

Ketika terhubung jala-jala, besar aliran daya ke *grid* dapat ditentukan dengan mengatur beda sudut fasa ( $\delta$ ) tegangan inverter dan *grid*. Nilainya berbanding lurus terhadap kenaikan beda sudut fasa.

*Power factor* keluaran inverter lima tingkat lebih baik dari tiga tingkat ketika terhubung jala-jala. Untuk inverter lima tingkat, PF berkisar 0.99, sedangkan inverter tiga tingkat

berkisar 0.9.

Nilai  $THD_i$  inverter lima tingkat lebih kecil dibandingkan dengan tiga tingkat ketika daya menuju *grid* divariasikan. Inverter lima tingkat menghasilkan  $THD_i$  di bawah 20 % setelah minimal daya 200 watt diinjeksi, sedangkan inverter tiga tingkat menghasilkan  $THD_i$  di atas 40 % pada setiap aliran daya.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. M. Shen, H. L. Jou, dan J. C. Wu, "Grid-Connected Power Converter with Islanding Detection and Active Power Filter Functions," in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Electron. Distrib. Generation Syst.*, Jun. 2010, pp. 501–506.
- [2] S. Khalid dan B. Dwivedi, "Power Quality Issues, Problems, Standards and Their Effects in Industry With Corrective Means," *International Journal*, Mei 2011.
- [3] U. S. Selamogullari, D. A. Torrey, dan S. Salon, "A Systems Approach for a Stand-Alone Residential Fuel Cell Power Inverter Design," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 3, pp. 741–749, Sep. 2010.
- [4] J. M. Shen, H. L. Jou, J. C. Wu, dan K. D. Wu, "Five-Level Inverter for Renewable Power Generation System," *IEEE Trans. Energy Convers.*, Maret. 2013.
- [5] Rashid M.H, "Power Electronics Handbook", Academic Press, 2001.
- [6] E.Sambath, S.P Natarajan, C.R. Balamurugan, "Performance Evaluation of Multi Carrier Based PWM Techniques for Single Phase Five Level H-Bridge Type FCMLI," ISSN: 2250-3021 Volume 2, Juli 2012.